

# 差分吸收大气 CO<sub>2</sub> 激光雷达的大气压力增宽修正算法

马 昕 林 宏 马 盈 盈 龚 威

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

**摘要** CO<sub>2</sub> 作为温室气体主要成分对全球气候有重要的影响。现有的被动观测设备都只能获得单点上空的 CO<sub>2</sub> 浓度值, 而差分吸收激光雷达在探测 CO<sub>2</sub> 方面具有巨大优势, 可以获得较高的时空分辨率。然而, 在利用差分吸收激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 浓度时, 其中的压力增宽有不可忽视的重要影响。基于此着重对压力增宽进行分析, 提出新的修正算法, 新方法同经典算法相比较, 减小了反演过程中的误差。实验中分别对一例仿真信号和实测信号进行反演, 最终获得了 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线分布较为理想的结果, 验证了新修正算法的可行性。

**关键词** 大气光学; 压力增宽; 修正算法; CO<sub>2</sub>; 差分吸收

**中图分类号** P412 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1101003

## Atmospheric Pressure Broadening Correction Algorithm of Differential Absorption Atmospheric CO<sub>2</sub> Lidar

Ma Xin Lin Hong Ma Yingying Gong Wei

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract** CO<sub>2</sub>, as the main component of greenhouse gases, has a major impact on the global climate. Currently, passive observation equipment can only get the CO<sub>2</sub> concentration over a single point. However, differential absorption lidar has great advantages in the detection of CO<sub>2</sub> and can get higher spatial and temporal resolution. At present, when using the differential absorption lidar to detect the concentration of CO<sub>2</sub>, the pressure broadening cannot be ignored. Focusing on the analysis of pressure broadening, a new correction algorithm is proposed which reduces the error in the inversion process when compared with the classical algorithm. After the inversion of the analog signal and measured signal, ultimately, the ideal results of the vertical profile of CO<sub>2</sub> concentration distribution are got and the feasibility of the new correction algorithm is verified.

**Key words** atmospheric optics; pressure broadening; correction algorithm; CO<sub>2</sub>; differential absorption

**OCIS codes** 010.1290; 140.3470; 280.1910

## 1 引 言

近几十年来, 人类活动和工业生产导致大气中温室气体和污染气体的含量急剧增加, 温室气体中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化会对全球气候产生重要影响。激光雷达是观测其垂直廓线分布的理想探测设备, 能

够进行连续的时间和空间观测。目前国内外已有多家研究机构开展了 CO<sub>2</sub> 激光雷达的研究工作: 中国科学院安徽光学精密机械研究所采用拉曼激光雷达来检测空气中 CO<sub>2</sub> 气体分布<sup>[1,2]</sup>; 美国国家航空航天局采用低轨道星载差分吸收激光雷达进行 CO<sub>2</sub>

**收稿日期**: 2012-05-11; **收到修改稿日期**: 2012-06-09

**基金项目**: 国家 973 计划(2011CB707106, 2009CB723905)和国家自然科学基金(41127901, 10978003)资助课题。

**作者简介**: 马 昕(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学与激光遥感、大气气溶胶监测等方面的研究。

E-mail: maxinwhu@gmail.com

**导师简介**: 龚 威(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学和激光遥感、地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@lmars.whu.edu.cn(通信联系人)

测量<sup>[3]</sup>;日本研究机构采用种子注入的光学参量振荡器(OPO)技术,进行差分实验测量大气 CO<sub>2</sub><sup>[4]</sup>;欧洲航天局采用机载 1.6 μm 窄带激光探测,以路径积分的差分吸收方法测量 CO<sub>2</sub> 光学厚度<sup>[5]</sup>。以上成果和实验分析进一步证明,现阶段差分吸收激光雷达在探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度方面具有不可替代的巨大优势。

差分吸收激光雷达是测量 CO<sub>2</sub> 浓度的先进方法。而随着差分吸收激光雷达的提出,其算法基本上已经固定,其中求解吸收截面积是整个算法最为关键的部分。Humlíček<sup>[6]</sup>利用 Vogit 方程将吸收截面积的求法中含有虚数部分的式子简化;Kameyama 等<sup>[7]</sup>初步获得了洛伦兹半峰全宽(FWHM)同压强的线性关系,引起一系列对于压力增宽修正的研究。这是针对洛伦兹 FWHM(求解吸收截面积的关键)经典算法的不确定性而提出的。

大气压强以及温度的变化会直接导致洛伦兹 FWHM 的变化,称为压力增宽,压力增宽的浮动直接影响到反演过程中最重要的吸收截面积部分,必须对其进行修正,以期获取更高的精度。在国外实验室环境下测量,最终获得了宽光谱范围内精确的洛伦兹 FWHM 同压强的对应关系。本文以该实验数据为基础,提取差分大气 CO<sub>2</sub> 激光雷达所用波长为 1.57 μm 激光的压力增宽一系列参数,并将其应用到 CO<sub>2</sub> 浓度反演中,实验结果显示反演精度得到显著改善。

## 2 差分吸收激光雷达原理及经典反演算法

### 2.1 差分吸收激光雷达原理

对于吸收激光雷达来说,可用信号表示被探测大气物质对激光束能量的吸收。同时为了得到吸收信号,还需将信号通过大气物质散射回来,形成激光雷达回波。为了尽量排除其他各种因素的影响,以获得准确的吸收信息,在差分吸收激光雷达中采用两束波长稍有差别的发射激光束,其中一束激光的波长在被探测组分吸收峰的中心,使其受到最大吸收,记为 λ<sub>on</sub>;另一束激光的波长在吸收峰的外边,使其受到的吸收尽可能小,记为 λ<sub>off</sub><sup>[8~10]</sup>。这两束波长的激光雷达方程为

$$P(R, \lambda) = \frac{P_0(\lambda)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_0(\lambda, R) + N_g(R) \sigma_g(\lambda)] dR \right\}, \quad (1)$$

式中 P<sub>0</sub> 为激光雷达发射功率,β 为大气后向散射系数,α<sub>0</sub> 为除被探测组分的吸收之外的所有大气物质的消光系数, N<sub>g</sub>(R) 为被探测组分密度的高度分布,是高度 R 的敏感函数,σ<sub>g</sub>(λ) 为被探测组分的吸收截面积,是波长 λ 的敏感函数。

由于两束波长非常接近,那么每个波长对应的 β 和 α<sub>0</sub> 将近似相等。将两束波长对应的(1)式相除,同时在实际实验中令 P<sub>0</sub>(λ<sub>on</sub>, R) = P<sub>0</sub>(λ<sub>off</sub>, R), 则高度 R 处厚度为 ΔR = R<sub>2</sub> - R<sub>1</sub> 的大气层中,被探测组分的平均密度为

$$N_g = \frac{1}{2[\sigma_g(\lambda_{on}) - \sigma_g(\lambda_{off})](R_2 - R_1)} \times \ln \frac{P(\lambda_{off}, R_2)P(\lambda_{on}, R_1)}{P(\lambda_{on}, R_2)P(\lambda_{off}, R_1)}. \quad (2)$$

可见,被探测组分的密度与两通道回波信号之比和两波长处的吸收截面积之差有关。

### 2.2 经典反演算法

σ<sub>g</sub> 的值与洛伦兹 FWHM 以及多普勒 FWHM 均相关<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_g(\nu) = \frac{yS}{\gamma_D \pi^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{(x-t)^2 + y^2} dt, \quad (3)$$

式中 y =  $\frac{\gamma_L}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2}$ , x =  $\frac{\nu - \nu_0}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2}$ , ν 为波数, S 为线强度, t 为积分变量, γ<sub>L</sub> 为洛伦兹 FWHM, γ<sub>D</sub> 为多普勒 FWHM。对于(3)式中的未知量,有如下的计算方法<sup>[12,13]</sup>:

$$S(T) = S_0 \frac{T_0}{T} \exp \left[ \frac{E' h c}{k_B} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (4)$$

$$\gamma_L = \gamma_0 \frac{P}{P_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (5)$$

$$\gamma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 \cdot (k_B T)}{m}}, \quad (6)$$

式中 S<sub>0</sub> 为中心线处的线强度, E' 为低状态能量, h 为普朗克常数, P 为压强, T 为温度, γ<sub>0</sub> 为标准大气压 P<sub>0</sub>(1.013 kPa) 和标准温度 T<sub>0</sub>(273 K) 下(标准状况下)的 FWHM, n 称为温度相关指数, c 为光速, k<sub>B</sub> 为玻尔兹曼常数, m 为分子质量。

## 3 压力增宽的新修正

### 3.1 压力增宽修正的必要性

目前应用于大气 CO<sub>2</sub> 气体浓度反演的最为广泛地数据库是 HITRAN, 可以从中得到各个波数激光的线强度、低能量状态、吸收截面积等数据。但 HITRAN 中的很多光谱参数都是几十年前测量得到的,并不能完全满足精密的 CO<sub>2</sub> 浓度反演要求,

一些数据必须得到更新。

一个十分重要的现实是,同碳源、碳汇的自然变化相比,大气中压强的变化更能够影响 CO<sub>2</sub> 浓度探测精度。因此对于对流层遥感探测,获取可靠的压力增宽光谱是十分必要的。目前国外许多星载 CO<sub>2</sub> 传感器希望能够提供超过 1% 的精度,压力增宽是其中的一个关键影响因素,也是 HITRAN 研究的薄弱之处。各个国家的许多科学家对于近红外波段的压力增宽进行了研究。

压力增宽的谱线形状由洛伦兹廓线给出。在高空中,压强同温度都存在一个渐进的变化,导致在不同的高度处洛伦兹廓线有所变化,从而导致计算 CO<sub>2</sub> 浓度的关键值(吸收截面积)变化。

### 3.2 压力增宽经典及新的修正算法

以往采用的气体分子运动理论中,FWHM 同压强和温度变化的关系按(5)式进行计算,其中有很大的不确定性。在参考状态下,对于地球大气中的大多数辐射活跃气体而言, $\gamma_0$  的取值范围在 0.01~0.1 cm<sup>-1</sup>,且随谱线变化明显,对于 CO<sub>2</sub> 分子, $\gamma_0$  约为 0.07 cm<sup>-1</sup>。温度相关指数  $n$  在 0.5~1.0 的范围内变动,其取 0.5 时称为经典值。这种取值上的模糊性,给反演结果带来了巨大的误差。

日本的 Kameyama 等<sup>[7]</sup> 研究发现,洛伦兹 FWHM 同压强的关系是线性的,与压力增宽系数密切相关;Predoi-Cross 等<sup>[14]</sup> 在与压强线性相关的基础上加入了温度的修正因子,同时更加精确地测定了温度相关指数  $n$  的数值(同波长密切相关)。测量实验中,CO<sub>2</sub> 与空气的体积比(CO<sub>2</sub> 浓度)从 0.01% 到 11% 不等,控制的实验温度值跨度相对较大,压强变

动范围广,采用了多光谱非线性最小二乘匹配技术,减小了系统误差,同时增加了参数的精确度。有

$$\gamma_L(P, T) = P \left[ b_{L(\text{air})} (1 - \chi) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{n_{\text{air}}} + b_{L(\text{CO}_2)} \chi \left( \frac{T_0}{T} \right)^{n_{\text{CO}_2}} \right], \quad (7)$$

式中  $b_{L(\text{air})}$  为标准状况下精确测定的大气压力增宽系数, $b_{L(\text{CO}_2)}$  是 CO<sub>2</sub> 气体的自增宽系数, $\chi$  是 CO<sub>2</sub> 与空气的体积比(CO<sub>2</sub> 浓度)。

将(7)式引入激光雷达中具有可行性和前沿性,针对激光雷达领域的特殊情况,提出两种方案:1)直接带值求解洛伦兹波长,迅速得到计算结果,具有运算速度快、避免误差二次引入的优点;2)采用迭代的方式,设定 CO<sub>2</sub> 与空气的体积比(CO<sub>2</sub> 浓度)初值 0.04% 作为迭代变量,经过一次迭代,反演得到浓度分布廓线即为  $\chi$ ,可以直接应用到二次迭代中,经过 3 或 4 次迭代,满足精度需求后停止。迭代方案 2) 的精度明显优于方案 1),迭代的方法是应用到激光雷达计算的一个创新。

上述两种方案都有其独特性。在实验初期采用带值求解,可以实现 CO<sub>2</sub> 浓度分布情况的实时监测,便于系统维护和调节;系统稳定工作后,运用迭代的方法,能够有效地提高精度。

根据 CO<sub>2</sub> 的吸收谱线,并考虑到相应的水汽干扰应该最小,选择波数为 6361.250 cm<sup>-1</sup> 的波长作为 on 波长,6360.716 cm<sup>-1</sup> 作为 off 波长。实际计算时,由于 off 波长的吸收截面积同 on 相比可忽略,往往只关注 on 的相关参数值在标准状况下的参数,如表 1 所示。

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

Wavenumber / cm <sup>-1</sup>	Line intensity / cm <sup>-3</sup>	$E''$	$b_{L(\text{air})} / \text{cm}^{-1}$	$n_{\text{air}}$
On; 6361.250	$1.720 \times 10^{-23}$	133.4393	0.07355	0.653

采用新的修正算法的最大优点就是摒除了经典修正算法在取值上的不确定性,避免了新的误差的带入。同时新修正算法参数的测量是在光谱范围内进行的,对于其他(如 2 μm)激光雷达也具有参考价值。

## 4 大气 CO<sub>2</sub> 浓度反演

### 4.1 仿真信号反演

最后制作了一组仿真数据,来进行压力增宽新修正算法的验证。需要指出的是,该组仿真信号中没有体现激光雷达的重叠效应,考虑到差分吸收激

光雷达的特殊性,即浓度反演时所用的是 on 和 off 回波信号的比值,因此重叠效应对于后期反演的影响会比较小。

利用(7)式进行了压力增宽的修正,同时对两束激光进行了吸收截面积的反演,与经典的修正算法进行了比较。从图 1 和图 2 中可以看出,修正后洛伦兹 FWHM 的增加会导致吸收截面积的减小。

新修正算法与经典算法计算得到的吸收截面积差别较小。经过计算并比较后发现,新修正算法能够将吸收截面积的误差减小 2% 左右。

图 3 是生成仿真信号的基础,用图 3 的结果以

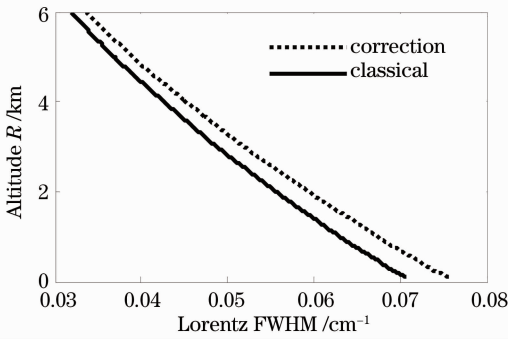


图 1 洛伦兹 FWHM 经典算法与修正算法比较  
Fig. 1 Comparison of the classical and the modified algorithm of Lorentz FWHM

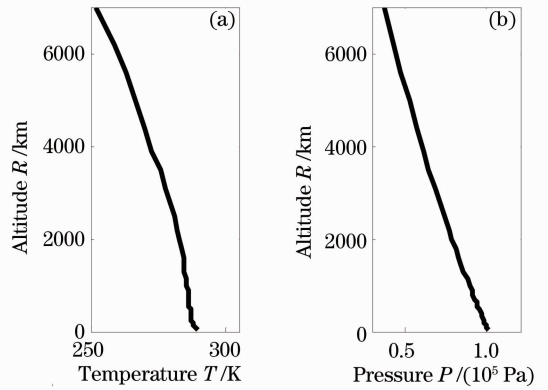


图 4 (a)模拟温度;(b)压强  
Fig. 4 (a) Simulation values of temperature;  
(b) pressure

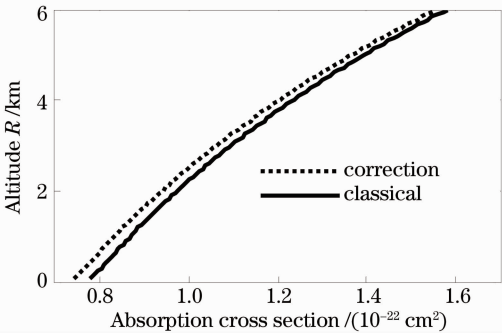


图 2 on 波长的吸收截面积

Fig. 2 Absorption cross section of on wavelength

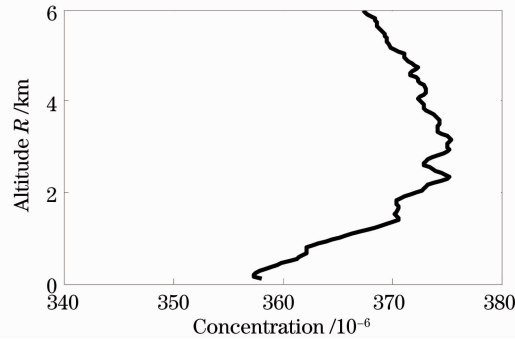


图 3 CO<sub>2</sub> 浓度分布

Fig. 3 Display of CO<sub>2</sub> concentration

及温度、压强值(见图 4)来反推出仿真信号(见图 5),然后利用该信号进行一系列计算,最终得到 CO<sub>2</sub> 浓度廓线,实际上也是对本算法的一个验证。采用仿真信号进行反演,结果令人较为满意。

#### 4.2 实测信号反演

为了进一步验证算法的有效性,采用文献[13]中的实测信号进行 CO<sub>2</sub> 浓度值的反演。同时也对信号获取时的大气压强与温度数据进行了收集。

在实际测量中,针对由大气闪烁和激光斑纹产生的回波信号波动,采用信号平均方法可以有效地提高信噪比。实测信号有这样的规律:在近地面处,

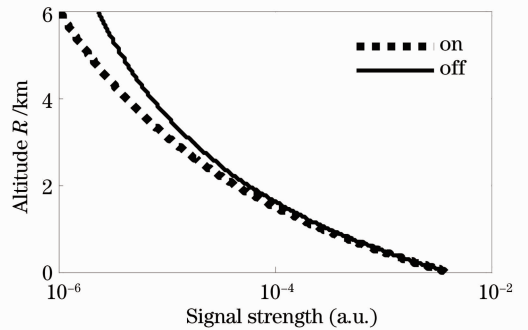


图 5 R<sup>2</sup> 修正后仿真信号强度

Fig. 5 Strength of simulation signal after R<sup>2</sup> correction

随着高度的增加两种回波信号均有增加,发射激光光束开始渐渐进入望远镜视场,即所谓的重叠效应;随着高度的进一步增加,信号开始逐渐减弱,这是大气对激光束发生多种作用的必然结果。CO<sub>2</sub> 气体分子对 on 波长激光是强吸收,对于 off 是弱吸收,on 波长的回波信号始终小于 off。所得结果如图 6~8 所示。

由于所获取的实测信号值以指数的形式存在,将数据再现的难度较大,对最终的反演结果影响较

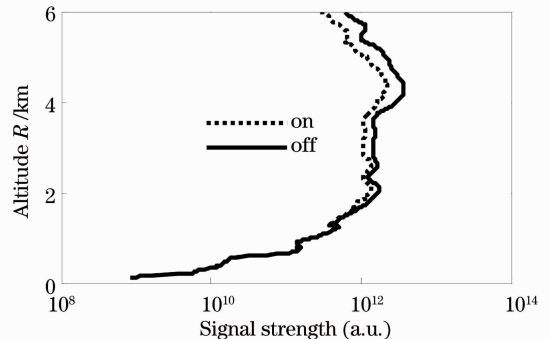


图 6 实测距离平方修正后的信号

Fig. 6 Measured signal after the square of the distance correction

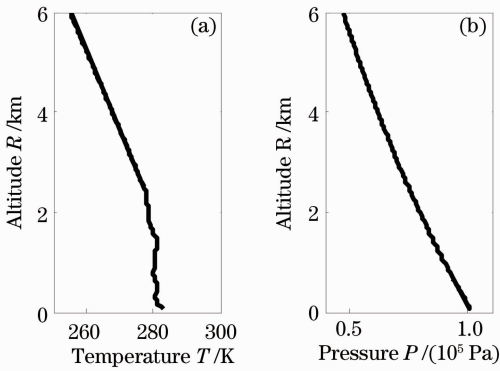


图 7 (a)温度; (b)实时压强

Fig. 7 (a) Temperature; (b) real-time pressure

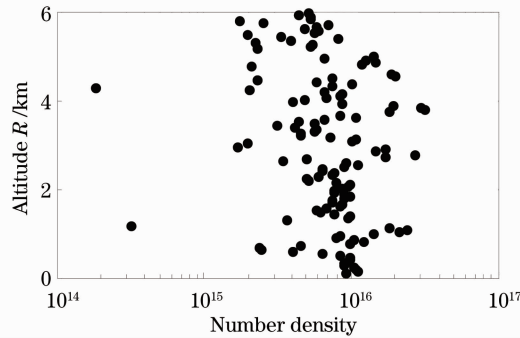


图 8 实测信号 CO<sub>2</sub> 的分子浓度直接反演结果 (距离分辨率为 45 m)

Fig. 8 Real-time measured signal direct inversion results of CO<sub>2</sub> number density (resolution range is 45 m)

大。从图 8 可以看出,反演结果不是特别令人满意。但大致可以得到 CO<sub>2</sub> 浓度分布的趋势,随着高度的增加,大约维持在 10<sup>16</sup> 左右。在高空(5 km 以上)以及低空(200 m 左右)中,浓度波动较大。

CO<sub>2</sub> 浓度值的直接反演结果是以分子浓度(每立方厘米空气中 CO<sub>2</sub> 分子个数)为横轴显示,应当转换为 CO<sub>2</sub> 与空气体积比  $\chi$ (CO<sub>2</sub> 浓度)。同时考虑到温度和压强的影响,它们之间的换算公式为

$$C = \frac{6.02 \times 10^{20}}{22.4} \chi \frac{T_0 P}{T P_0} \quad (8)$$

降低距离分辨能力能够提高 CO<sub>2</sub> 浓度反演的精度,反演结果如图 9 所示。图 9 是分别采用了带值计算和迭代方法进行反演的结果。两种方法的差异较小,但迭代后结果精度较高。目前国际上已经在运行的机载和星载探测系统,对 CO<sub>2</sub> 浓度进行探测,得到的都是柱浓度的数据,基本没有距离分辨能力。与之相比,地基激光雷达具有距离分辨能力是一个很大的进步,另外降低空间分辨率能力可以有效地提高数据的质量,使浓度反演精度更高。图 9 同图 8 相比,采用了大段距离进行积分,丢失了部分

距离信息的同时,精度有很大提高。

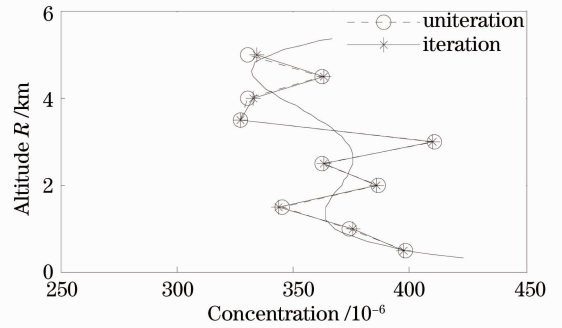


图 9 反演结果

Fig. 9 Inversion results

新修正方法可以提高反演的精度,能够摒除经典算法在取值上的不确定性,因此在后续的实测实验中能够得到应用,同时可以采用其他近地面探测手段来进行验证。应该指出,压力对反演有增宽、频移等影响,在获取激光雷达回波信号时,必须重视对压力数据的获取。

## 5 结 论

差分吸收激光雷达测量大气 CO<sub>2</sub> 浓度在国内外都有较为重要的科学意义和较为巨大的应用价值。通过介绍差分吸收激光雷达原理,考虑影响反演精度的重要问题(即压力增宽),并利用修正后的压力增宽公式,对仿真和实测回波信号进行反演,得到了良好结果,将吸收截面积的误差减少了 2% 左右。修正后的压力增宽算法所用到的参数是独立实验、独立测量的,可以在激光雷达中得到广泛的应用,充分克服了经典算法的局限性。同时提出了利用修正公式的两种不同方案,也进一步验证了差分吸收激光雷达在测量大气 CO<sub>2</sub> 浓度方面的优势。从理论上对吸收截面积进行了研究。在硬件方面,对激光器波长的标定工作十分重要,必须进行激光器的稳频处理。在软件方面,差分吸收激光雷达反演优化还有很多的工作要做,特别是温度和压强对于频移的影响(CO<sub>2</sub> 的吸收峰会随着温度和压强的变化而产生偏移)不容忽视。当然同压力增宽的影响相比,频移的影响较小,但也不可忽视。

## 参 考 文 献

- Zhao Yuefeng, Zhang Yinchao, Hong Guanglie *et al.*. Lidar system for detecting the atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 355~359
- 赵曰峰, 张寅超, 洪光烈 等. 大气 CO<sub>2</sub> 含量分布激光雷达监测 [J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 355~359
- Tao Zongming, Zhang Yinchao, Cen Gang *et al.*. Estimating

- method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 602~604
- 陶宗明, 张寅超, 岑 岗 等. 激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 602~604
- 3 J. Mao, S. R. Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 914~927
- 4 S. Nakamachi, Y. Kawauchi, H. Fukuda *et al.*. Buffer-gas pressure broadening for the  $(3\ 0\ 1) \leftarrow (0\ 0\ 0)$  band of CO<sub>2</sub> measured with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006, **8**(3): 364~368
- 5 A. Amediek, A. Fix, G. Ehret *et al.*. Airborne lidar reflectance measurements at 1.57  $\mu\text{m}$  in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2009, **2**: 1487~1536
- 6 J. Humlíček. Optimized computation of the Voigt and complex probability functions [J]. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1982, **27**(4): 437~444
- 7 S. Kameyama, M. Imaki, Y. Hirano *et al.*. Development of 1.6  $\mu\text{m}$  continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO<sub>2</sub> sensing[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1513~1515
- 8 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environmental Monitoring Lidar[M]. Beijing: Science Press, 2001. 184~185  
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 184~185
- 9 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315~320
- 董云升, 刘文清, 刘建国 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 315~320
- 10 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0401004
- 袁宏武, 梅海平, 黄印博 等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0401004
- 11 S. Ismail, E. V. Browell. Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(17): 3603~3615
- 12 A. Amediek, A. Fix, M. Wirth *et al.*. Development of an OPO system at 1.57  $\mu\text{m}$  for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2008, **92**(2): 295~302
- 13 D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai *et al.*. Development of a 1.6  $\mu\text{m}$  differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO<sub>2</sub> profile[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(4): 748~757
- 14 A. Predoi-Cross, A. R. W. McKellar, D. C. Benner *et al.*. Temperature dependences for air-broadened Lorentz half-width and pressure shift coefficients in the 30013 $\leftarrow$ 00001 and 30012 $\leftarrow$ 00001 bands of CO<sub>2</sub> near 1600 nm [J]. *Can. J. Phys.*, 2009, **87**(5): 517~535

栏目编辑: 王晓球